

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Харківська національна академія міського господарства

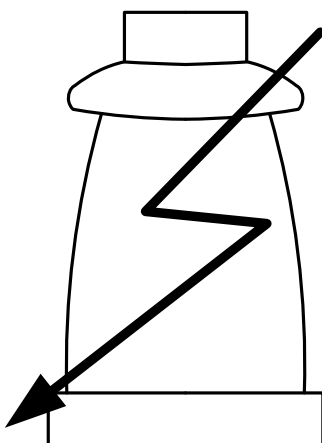


МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до проведення практичних занять
з курсів

«ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКОЇ НАПРУГИ»
та
«ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ»

*(для студентів 4 курсу денної та 4-5 курсів заочної форм навчання
напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»)*



Харків
ХНАМГ
2011

Методичні вказівки до проведення практичних занять з курсів «Техніка та електрофізика високої напруги» та «Техніка високих напруг» (для студентів 4 курсу денної та 4-5 курсів заочної форм навчання напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: В. Ф. Рой. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 26 с.

Укладач: В. Ф. Рой

Рецензент: проф., д.т.н. В. А. Малярєнко

Рекомендовано кафедрою ЕМ,
протокол № 5 від 22.12.2010 р.

З М І С Т

Стор.

Загальні положення	4
1. Заняття 1. Електрофізичні процеси в діелектриках	5
2. Заняття 2. Захист електрообладнання від вражень блискавки	8
3. Заняття 3. Стійкість електрообладнання від перенапруг	13
4. Заняття 4. Перехідні процеси в ЛЕП	17
Список джерел	24
Додаток	25

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Дані методичні вказівки містять основні методи розв'язання задач з курсу «Техніка та електрофізика високої напруги» при проведенні практичних занять зі студентами 5 курсу заочної форми навчання. Запропоновані задачі відповідають основним розділам лекційного курсу, супроводжуються рекомендаціями щодо їх рішень і допомагають студентами краще засвоїти матеріал.

У результаті проведених практичних занять студенти повинні засвоїти основні положення електрофізичних процесів у діелектричних матеріалах високовольтного обладнання, оволодіти сучасними інженерними методами розрахунку параметрів високовольтного електрообладнання, грозозахисних систем, заземлюючих пристроїв, принципів захисту підстанцій і ліній електропередач від грозових та комутаційних перенапруг, а також негативних факторів зовнішнього середовища.

Підсумком проведення практичних занять є виконання студентами підсумкової контрольної роботи.

Контрольна робота складається з п'яти питань, кожне з яких підсумовує відповідний розділ курсу «Техніка та електрофізика високої напруги».

У методичних вказівках наведені довідкові дані та рекомендації, які необхідні для проведення необхідних розрахунків.

Наведений список довідкової літератури дає змогу отримати необхідні дані для проведення практичних занять і виконання контрольної роботи, а також поглибити знання з основних розділів курсу.

У Додатку наведені варіанти завдань для підсумкового контролю знань і оцінки вміння студентів вирішувати практичні задачі з деяких питань електроенергетики.

При вивченні курсу «Техніка та електрофізика високої напруги» робочою програмою курсу передбачено 8 академічних годин/0,5 кредитів ECTS, які розподілені на 4 занять за двома змістовними модулями.

Заняття 1

ЗМ 1. Електрофізичні процеси в діелектриках

1 академічна година

№ п/п	Навчальне питання	Час, хвилини	Метод проведення
1	Вступне слово викладача, перевірка готовності студентів до проведення заняття	10	Доведення
2	Вирішення задачі	30	Рішення
5	Підведення підсумку занять	5	Доведення

Задача 1

Визначити шлях, що його проходить електрон для іонізації молекули азоту в електричному полі напруженістю $E = 30$ кВ/см, якщо потенціал іонізації молекули азоту складає $U_i = 15,8$ В.

Варіанти: $E = 40$ кВ/см; $E = 50$ кВ/см; $E = 60$ кВ/см; $E = 70$ кВ/см; $E = 80$ кВ/см.

Рішення

Згідно з формулою $x = U_i/E$ знаходимо відстань, яку проходять позитивні та негативні іони в повітрі при нормальних атмосферних умовах за час $\Delta t = 0,005$ с, що складає чверть періоду промислової частоти 50 Гц в електричному полі з середньою напруженістю 5 кВ/см, якщо рухливість позитивних іонів $K^+ = 1,6$ см/с/В/см, а негативних $K^- = 2,2$ см/с/В/см.

Визначаємо швидкість іонів: $V^+ = K \cdot E = 1,6 \cdot 5 \cdot 10^3 = 8 \cdot 10^3$ см/с,

$$V^- = K \cdot E = 2,2 \cdot 5 \cdot 10^3 = 11 \cdot 10^3 \text{ см/с.}$$

Відстань, що пройдена іонами: $L^+ = 8 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 40$ см,

$$L^- = 11 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 55 \text{ см.}$$

Задача 2

У процесі експлуатації кабелю між шарами діелектрика утворився тонкий прошарок газу.

Визначити напруженість електричного поля в цьому прошарку, якщо радіуси внутрішнього та зовнішнього струмопроводів складають, відповідно, $r_1 = 1$ см та $r_2 = 6$ см; радіус розташування прошарку $r_1 = 2$ см, діелектрична проникність діелектрика $\varepsilon_1 = 6$, ($\varepsilon_2 = 1$) амплітуда прикладаної напруги

$$U = \frac{35 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 28,5 \text{ кВ.}$$

Варіанти: $U = (45/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$; $(55/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$; $(110/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$; $(250/\sqrt{3}) \cdot \sqrt{2}$ кВ.

Рішення

Для визначення напруженості в тонкому повітряному прошарку застосуємо формулу $E_1/E_2 = \varepsilon_2/\varepsilon_1$, звідки: $E_2 = E_1(\varepsilon_1/\varepsilon_2)$. Тоді напруженість електричного поля в однорідному середовищу у місці розташування прошарку дорівнюватиме:

$$E_1 = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} = 28,5/2 \cdot \ln(6/1) = 7,95 \text{ кВ/см.}$$

Напруженість електричного поля в повітряному прошарку

$E_2 = E_1 \cdot (\varepsilon_1/\varepsilon_2) = 7,95 \cdot (6/1) = 47,6$ кВ, що достатньо для виникнення процесу ударної іонізації в газі.

Задача 3

Розрахувати напругу теплового пробою прохідного ізолятора з внутрішнім та зовнішнім радіусами електродів:

$r_1 = 2,1$ см, $r_2 = 3,1$ см. В якості діелектрика використаний бакелітований папір, теплопровідність якого $k = 0,029$ Вт/см \cdot °С. Кут діелектричних втрат при $T = 20$ °С дорівнює 1%. Ізолятор є вводом в трансформатор з температурою масла до 90 °С. Коефіцієнт зовнішньої теплопровідності дорівнює $0,017$ Вт/см² \cdot °С.

Температурний коефіцієнт a для $\operatorname{tg} \delta$ дорівнює 0,05. Відносна діелектрична проникність паперу $\varepsilon = 4,5$. Параметр $\varphi(c) = 0,4$, частота $f = 50$ Гц.

Варіанти: $r_1 = 3$ см, $r_2 = 3,2$ см; $r_1 = 3,4$ см, $r_2 = 3,6$ см; $r_1 = 4$ см, $r_2 = 4,1$ см.

Рішення

Температура теплового пробою прохідного ізолятора згідно з теоремою Фока визначається формулою:

$$U_{np} = 3,79 \cdot 10^3 \sqrt{\left(\frac{k}{a \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta} \right)} \cdot \varphi(c), \text{ кВ.}$$

(Відповідь – 53 кВ).

Задача 4

Відома напруга пробою іскрового проміжку з рівномірним електричним полем $s = 1$ см при нормальних атмосферних умовах. Величину проміжку збільшуємо вдвічі, а температуру підвищуємо до 100 °С. Як треба змінити тиск p , щоб розрядна напруга проміжку U_p залишилась незмінною?

Варіанти: $s = 2$ см; $s = 3$ см; $s = 4$ см; $s = 5$ см. Температуру збільшуємо на: 200 °С; 250 °С; 300 °С; 350 °С.

Рішення

Для визначення розрядної напруги іскрового проміжку використовуємо формулу закону Пашена:

$$U_p = \frac{B(\delta \cdot s)}{C + \ln(\delta \cdot s)},$$

де $B = A_\delta \cdot U_i$ – константи, що залежать від типу середовища та форми електродів.

Для повітря коефіцієнт $A_\delta = 11,1 \cdot 10^3$; $C = \ln \frac{A_\delta}{\ln(1 + 1/\gamma)}$.

При $L = \text{const}$, $U_p = f(\delta \cdot s)$.

З врахуванням $\delta = 0,386 \cdot p/T$, знаходимо $\delta = 0,386 \cdot 760/(273 + 100) = 0,62$, тоді тиск: $p = 476$ мм рт. ст.

Заняття 2

ЗМ 1. Захист електрообладнання від вражень блискавкою

2 академічні години

№ п/п	Навчальне питання	Час, хвилини	Метод проведення
1	Вступне слово викладача, перевірка готовності студентів до проведення заняття	10	Доведення
2	Вирішення задачі	70	Рішення
5	Підведення підсумку занять	10	Доведення

Задача 1

Захистити відкритий розподільчий пристрій (ОРУ) на 220 кВ від прямих ударів блискавки. Розмір споруди: $40 \times 50 \times 5$ м.

Варіанти: Розмір споруди: $55 \times 60 \times 5$ м; $65 \times 70 \times 4$ м; $75 \times 80 \times 5$ м; $85 \times 90 \times 5$ м.

Рішення

Для побудови та розрахунку зони захисту стрижневого блискавковідводу використовуємо формулу

$$r_x = h_a \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot p,$$

де r_x – радіус кола, яке описане навколо прямокутника 40×50 м,

h_a – висота об’єкта = 5 м,

h – висота стрижневого блискавковідводу:

$$h_a = h - h_x.$$

Радіус кола захисної зони r_x визначаємо з прямокутного трикутника:

$$r_x = (\sqrt{40^2 + 50^2})/2 = 32 \text{ м.}$$

Для імовірності 0,05 прориву блискавки в зону захисту висота блискавковідводу визначається за спрощеною формулою

$$r_x = 1,6 \cdot (h - h_x/0,92),$$

тоді: $50 = 1,6 (h - 5/0,92)$, звідки: $h = 70$ м.

Досліджуємо умову непрориву блискавки в зону захисту:

$$D < 8h \cdot p \quad (32 \cdot 2) < 8 \cdot 70 \cdot p \quad (D - \text{діаметр кола зони захисту}).$$

Оскільки для $h > 30$ м, $p = 5,5/\sqrt{h}$, то очевидно, що умова непрориву виконується.

Задача 2

Визначити величину струму, при якому відбудеться зворотне перекриття гірлянди ізоляторів на дволанцюговій металевій баштовій опорі 220 кВ. Лінія захищена одним тросом на висоті 40 м з кутом захисту $= 25^\circ$. Хвильовий опір троса $Z = 400$ Ом, геометричний коефіцієнт зв'язку троса з верхніми проводами $k = 0,2$, довжина прольоту $L = 300$ м. Крутизна фронту струму блискавки $a = 20$ кА/мкс.

Варіанти: $L = 100$ м; 200 м; 400 м. $a = 30$ кА/мкс; 40 кА/мкс; 50 кА/мкс.

Рішення

Для розрахунку індуктивності тросів L_{mp} в прольоті можна використати формулу: $L_{mp} = \frac{Z}{2} \cdot (l/c) = 400 \cdot 300/2 \cdot 300 = 200$ мкГн, тоді коефіцієнт

$$\alpha \approx R_3/L_{mp} = 20/200 = 0,1 \text{ (1/мкс)}.$$

Для визначення струму в опорі використовуємо формулу

$$I_{on} = a \cdot t \cdot m \cdot [(1 - e^{-\alpha t})/\alpha t], \quad \text{приймаємо } t = 4,4 \text{ мкс, тоді:}$$

$$I_0 = a \cdot t_p = 20 \cdot 0,44 \approx 88 \text{ кА}.$$

Задача 3

Визначити імпульсний опір двохстороннього заземлювача в ґрунті з питомим опором $p = 500$ Ом·м, довжиною $l = 2 \times 20$ м, глибиною занурення в землю $t = 0,8$ м. Матеріал заземлювача – смуга розміром 4×40 мм².

Величина струму блискавки $I_0 = 80$ кА.

Варіанти: $I_0 = 60$ кА; 70 кА; 90 кА; 100 кА. $l = 2 \times 30$ м; 3×40 м; 30×50 м.

Рішення

Для визначення величини опору горизонтального заземлювача скористуємося стандартною формулою

$$R_r = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2t} \right) = 40 \text{ Ом.}$$

Імпульсний струм кожної сторони заземлювача дорівнює:

$$I_{\text{ол}} = 80/2 = 40 \text{ кА.}$$

За графіком (рис. 1) для $l = 20$ і $p = 500$ Ом визначаємо коефіцієнт імпульсу $\alpha \approx 0,6$. Тоді імпульсний опір однієї сторони заземлювача буде дорівнювати:

$$R_{i1} = R \cdot \alpha = 40 \cdot 0,6 = 24 \text{ Ом.}$$

Оскільки коефіцієнт двохстороннього заземлювача дорівнює 1, то сумарний імпульсний опір заземлювача: $R_i = 24/1 \cdot 2 = 12 \text{ Ом.}$

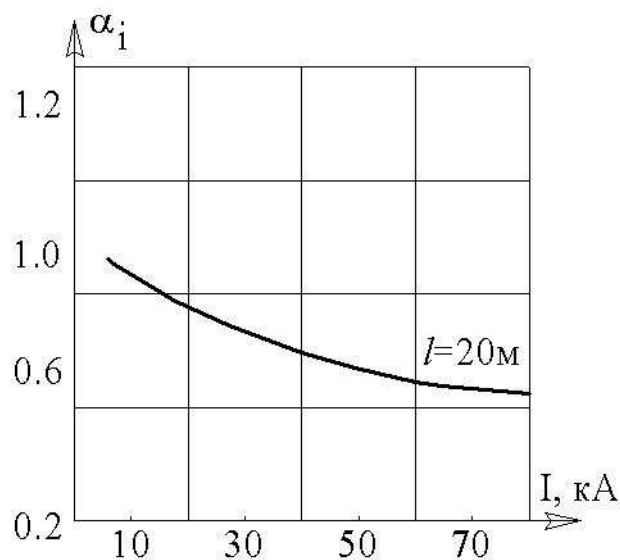


Рис. 1 – Графік визначення імпульсного коефіцієнта α

Задача 4

Визначити критичну напруженість рівномірного електричного поля в повітрі на ділянці $L = 2$ см при тиску $p = 700$ мм рт. ст. і температурі

$$T = 40 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Варіанти: $L = 2$ см; $L = 3$ см; $L = 4$ см. $p = 760$ мм рт. ст.; $p = 800$ мм рт. ст.

Рішення

Визначаємо густину повітря δ згідно з формулою:

$$\delta = (p/p_o) \cdot (T_o/T) = 0,386 \cdot [700/(273 + 40)] = 0,86.$$

Коефіцієнт ударної іонізації α визначаємо за формулою:

$$\alpha/p = a \cdot (E/p - b)^2,$$

тут E – напруженість електричного поля,

для атмосферного повітря: $a = 1,52 \cdot 10^{-4}$; $b = 31,6$ В/(см · мм рт. ст.).

Звідки $\alpha = 20/2 = 10$.

За графіком (рис. 2) знаходимо, що параметр $\alpha/\delta = 10/0,86 = 11,6$ і відповідає значенню $E/\delta = 32$. Звідки шукане значення $E_{кр} = 32 \cdot 0,86 = 27,5$ кВ/см.

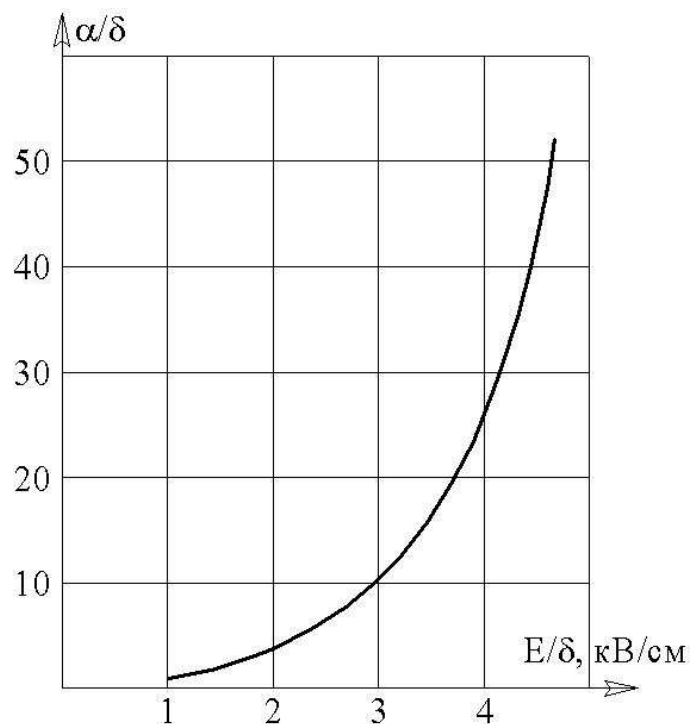


Рис. 2 – Залежність параметра $\alpha/\delta = f(E/\delta)$ для повітря

Задача 5

Розрахувати напругу проббою плоского скляного діелектрика товщиною d в межах 1-4 см, якщо коефіцієнт внутрішньої теплопровідності $k = 0,0017$ Вт/см²°С.

Температура зовнішнього середовища $T = 20$ °С (293 К); $tg \delta = 0,01$; температурний коефіцієнт $\alpha = 0,0184$; діелектрична проникність скла $\epsilon = 6$.

Варіанти: $T = 30$ °С; $T = 40$ °С; $T = 50$ °С. $\epsilon = 5$; $\epsilon = 8$; $\epsilon = 2$.

Рішення

Для визначення напруги пробою U_{np} доцільно використати формулу для

плоского конденсатора:
$$U_{np} = 3,79 \cdot 10^3 \sqrt{\left(\frac{k}{a \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta} \right)} \cdot \varphi(c),$$

де f – промислова частота 50 Гц;

параметр $c = \alpha\lambda/2k$ при $d = 1$ і 4 см дорівнює:

$$c \cdot (d = 1 \text{ см}) = (1 \cdot 0,017)/(2 \cdot 0,01) = 0,85; \quad c \cdot (d = 4 \text{ см}) = 3,4.$$

За графіком (рис. 3) знаходимо значення функції $\varphi(c)$:

$$\varphi(c)_{d=1} = 0,35; \quad \varphi(c)_{d=4} = 0,52.$$

Напруга пробою:

$$U_{np}(d = 1) = 3,79 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{0,01}{0,0184 \cdot 50 \cdot 6 \cdot 0,01}} \cdot 0,35 = 560 \text{ кВ.}$$

$$U_{np}(d = 4) = 830 \text{ кВ.}$$

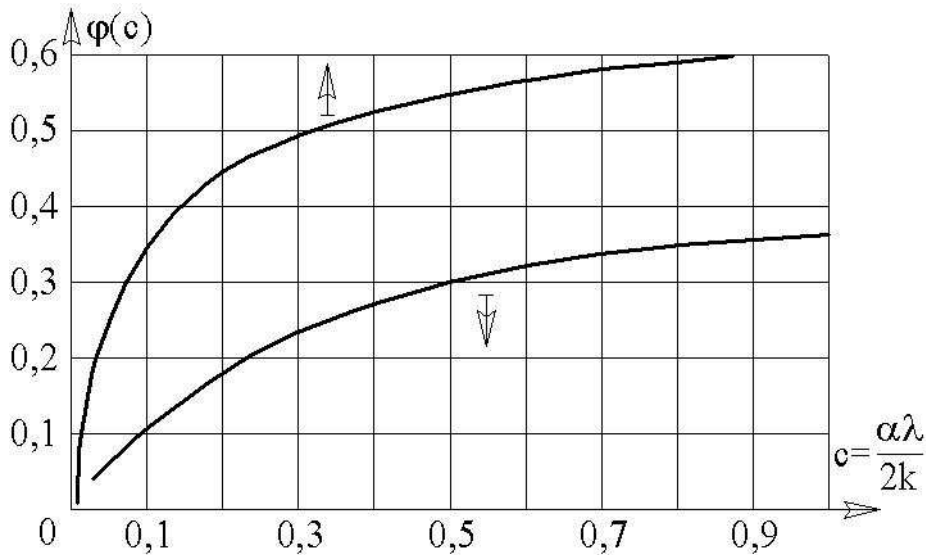


Рис. 3 – Залежність параметра $\varphi(c)$ для розрахунку напруги теплового пробою

Заняття 3

ЗМ 1. Стійкість електрообладнання від перенапруг

2 академічні години

№ п/п	Навчальне питання	Час, хвилини	Метод проведення
1	Вступне слово викладача, перевірка готовності студентів до проведення заняття	10	Доведення
2	Вирішення задачі	70	Рішення
5	Підведення підсумку занять	10	Доведення

Задача 1

Блискавка вразила дволанцюгову металеву башту опору ЛЕП 220 кВ без тросів, крутість імпульсу перенапруги $a = 20$ кА/мкс. Висота опори до рівня підвісу проводів $h_{on} = 31$ м; середня висота проводів в прольоті $h_{np} = 25$ м. Заземлювач – горизонтальний, подвійний з довжиною однієї гілки $l = 20$ м і глибиною залягання $t = 0,8$ м. Питомий опір ґрунту $\rho = 500$ Ом·м.

Визначити, при якому струмові блискавки відбудеться зворотній пробій ізоляції?

Варіанти: $l = 30$ м; $l = 40$ м; $l = 50$ м. $\rho = 300$ Ом·м; $\rho = 400$ Ом·м; $\rho = 600$ Ом·м.

Рішення

Враховуючи питому індуктивність опори $L_o = 0,65$ мкГн/м, визначаємо індуктивність опори: $L_{on} = L \cdot h = 0,65 \cdot 31 = 20$ мкГн.

Величина індукованої напруги на проводі дорівнює:

$$U_{ind} = a \cdot (L_{on} + L_e) = 20 \cdot (20 + 25) = 900 \text{ кВ. Коефіцієнт } L_e = h = 25 \text{ мкГн.}$$

Опір заземлювача на змінному струмі:

$$R_{\sim} = 40/2 = 20 \text{ Ом.}$$

Падіння напруги на ньому: $U_z = I_{\bar{o}} \cdot R_i$.

Імпульсний опір: $R_i = \alpha \cdot R$.

Параметр d_i визначаємо з графіка (рис. 4).

Тоді: $I_{\bar{o}} = d_i \cdot t_p = 20 \cdot 2,15 = 43 \text{ кА.}$

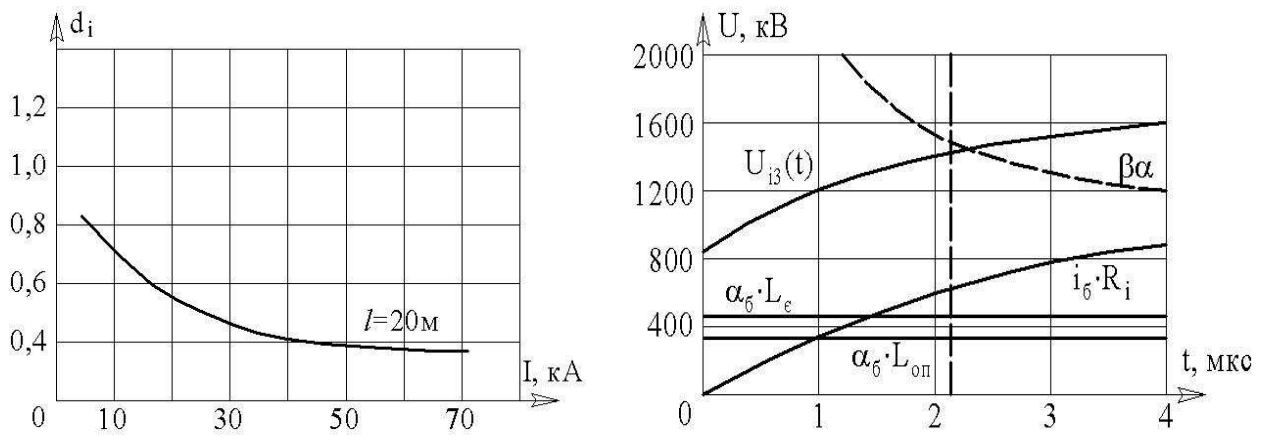


Рис. 4 – Розрахункові криві імпульсного коефіцієнта d_i та крива напруги на ізоляції опори U_{on} при ПУБ в опору

Задача 2

Визначити питоме число перекриття ЛЕП-110 на дерев'яних П-подібних опорах; відстань між проводами $l = 4$ м; висота підвісу проводів $h_{np} = 10$ м; коефіцієнт зв'язку між проводами $k_0 = 0,2$.

Варіанти: $h_{np} = 6$ м; $h_{np} = 8$ м; $h_{np} = 11$ м. $l = 5$ м; $l = 6$ м.

Рішення

Визначимо розрядну напругу міжфазної ізоляції дерев'яній опори 110 кВ.

$$U_{i3} = \alpha \cdot k \cdot U_{mr},$$

де α – коефіцієнт, що враховує дерево, як додаткову ізоляцію ($\alpha = 1,2$);

U_{mr} – мікророзрядна напруга дерев'яної опори, що складає 1560 кВ;

k – коефіцієнт імпульсу:

$$k = 1 + 0,5 \cdot \left(\frac{U_{\phi}}{U_{mr}} - 1 \right).$$

Враховуючи, що імпульсна електрична міцність комбінованої ізоляції: дерево + кераміка гірлянди складає 300 кВ/м при мінімальній імпульсній напрузі підвісних ізоляторів, знаходимо струм блискавки, що призводить до перекриття ізоляції:

$$I_{\phi} = 4U_{i3}/Z \cdot (1 - k) = 4 \cdot 1560/300 \cdot 0,7 = 30 \text{ кА}$$

(k – коефіцієнт зв'язку між проводами: $k = 0,3$).

Імовірність перевищення такого струму знаходимо з виразу:

$$\lg P_i = -I_{\phi}/60 = 0,32.$$

Питоме число перекриття ізоляції: $n_{пер} = n \cdot P$ ($n = 0,08h$, $P = 35\%$ – імовірність перекриття ізоляції від величини струму блискавки).

Тоді: $n_{пер} = 0,06 \cdot 10 \cdot 0,32 = 0,2$.

Коефіцієнт переходу імпульсного розряду в силову дугу: $\gamma = 0,25$, тоді питоме число відключень ЛЕП дорівнює:

$$N_{відкл} = 0,2 \cdot 0,25 = 0,05.$$

При кількості грозових днів у році $n = 40$, річне число відключень ЛЕП на 100 км дорівнює:

$$N_{відкл} = 40 \cdot 0,05 = 2.$$

Задача 3

Розрахувати величину перенапруги, що може виникнути при відключенні ненавантаженого трансформатора на стороні 110 кВ, потужністю $P = 90$ МВА, $U_H = 110$ кВ, $I_m = 1\%$, ємкість обмотки $C = 2000$ пф; струм зрізу вимикача $I_{зр} = 10$ А.

Варіанти: $U_H = 35$ кВ; $U_H = 150$ кВ; $U_H = 220$ кВ. $P = 80$ МВА; $P = 100$ МВА.

Рішення

Індуктивність обмотки трансформатора визначаємо за формулою

$$L_o = U_H^2 / \omega \cdot P \cdot I_m = 110^2 / 314 \cdot 90 \cdot 0,01 = 43 \text{ Гн.}$$

Характеристичний опір обмотки дорівнює:

$$Z = \sqrt{\frac{L_o}{C}} = \frac{43}{2} \cdot 10^9 = 14,5 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Амплітуда струму намагнічування:

$$I_H = \sqrt{2} \cdot P \cdot I_m / \sqrt{3} \cdot U_H = 2 \cdot 90 \cdot 10^3 \cdot 0,01 / 3 \cdot 110 = 6,7 \text{ А} < I_{ср}.$$

Вважаємо, що зріз відбувається на максимальному струмові: $I_{зр} = 6,7$ А, при цьому $U_{зр} = 0$, тоді:

$$U_{пер} = I_{зр} \cdot \sqrt{\frac{L_o}{C}} = 6,7 \cdot 14,5 \cdot 10^4 \cdot 10^{-3} = 980 \text{ кВ.}$$

Така перенапруга неприпустима для обмотки 110 кВ, тому її необхідно обмежувати підключенням розрядника до клем трансформатора.

Задача 4

Розрахувати ізоляцію ЛЕП-330 кВ на залізобетонній опорі з відтяжками і гірляндами П-8,5. Район забруднення – перший. Висота траси над рівнем моря – до 1000 м.

Варіанти: ЛЕП-220 кВ; ЛЕП-110 кВ; ЛЕП-550 кВ.

Рішення

Величина комутаційних перенапружень визначається за формулою

$$U_{\kappa} = k \cdot U_{\phi} = 2,7 \cdot 363 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 800 \text{ кВ},$$

тут k – коефіцієнт кратності перенапруги.

Величина середнього значення мікророзрядної напруги гірлянди:

$$U_{\text{мр}} = \frac{U_{\kappa}}{(k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4)},$$

де k_1 – поправка на тиск;

k_2 – на забруднення ізолятора;

k_3 – коефіцієнт імпульсу;

$k_4 = 0,85$.

$$U_{\text{мр}} = 800 / (0,85 \cdot 0,94 \cdot 1,1 \cdot 1,1) = 825 \text{ кВ}.$$

Число ізоляторів в гірлянді 330 кВ визначаємо за формулою

$$U_{\text{мр}} = E_{\text{мр}} \cdot n \cdot h,$$

де n – кількість ізоляторів в гірлянді;

h – їх висота.

Тоді: $n = 825 / (2,95 \cdot 20,3) = 13,7 = 14$ шт.

Повне число N ізоляторів П-8,5 у підтримуючій та натяжній гірлянді:

$$N = n + 1 = 15 \text{ шт.}$$

Перевірка гірлянди на достатність шляху витоку:

$$(N \cdot I) \cdot U = (15 \cdot 34,5) / \sqrt{3} = 2,45 \text{ кВ/см.}$$

Величину розрядних напруг визначають за формулами

$$U_p = U_{\phi} / (k_3 \cdot \delta/k) = (363 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}) / (0,85 \cdot 0,84) = 415 \text{ кВ},$$

$$U_{\text{рк}} = U_{\phi} / (k_3 \cdot \delta/k) = 800 / (0,85 \cdot 0,84) = 1120 \text{ кВ}$$

(тут δ/k – поправка на густину та вологість повітря).

Заняття 4

ЗМ 1. Перехідні процеси в ЛЕП

2 академічних години

№ п/п	Навчальне питання	Час, хвилини	Метод проведення
1	Вступне слово викладача, перевірка готовності студентів до проведення заняття	10	Доведення
2	Вирішення задач	70	Рішення
5	Підведення підсумку занять	10	Доведення

Задача 1

Визначити величину струму у вентильному розряднику в режимові багаторазового відбиття хвилі перенапруги. При розрахунках використати замість ділянки лінії сконцентровані індуктивність L або ємність C .

Варіанти: $L = 2$ мкГн; $L = 3$ мкГн; $L = 4$ мкГн. $I_0 = 20$ кА; $I_0 = 30$ кА; $I_0 = 40$ кА.

Рішення

На основі схеми заміщення (рис. 5) для розрядного струму використаємо формулу

$$I_p = (T_e/L) \cdot [U_3 - U_p \cdot (1 - \ln \frac{U_3}{U_p})],$$

тут $U_3 = I_0 \cdot R_3$; I_0 – струм блискавки; R_3 – опір заземлення; $T_e = 2\pi\sqrt{LC}$.

Задаючись значеннями U_p та I_0 побудувати криву $I_p = f(U_p)$ і знайти точку перетину цієї кривої з вольт-амперною характеристикою розрядника, яка і визначатиме величину струму вентильного розрядника.

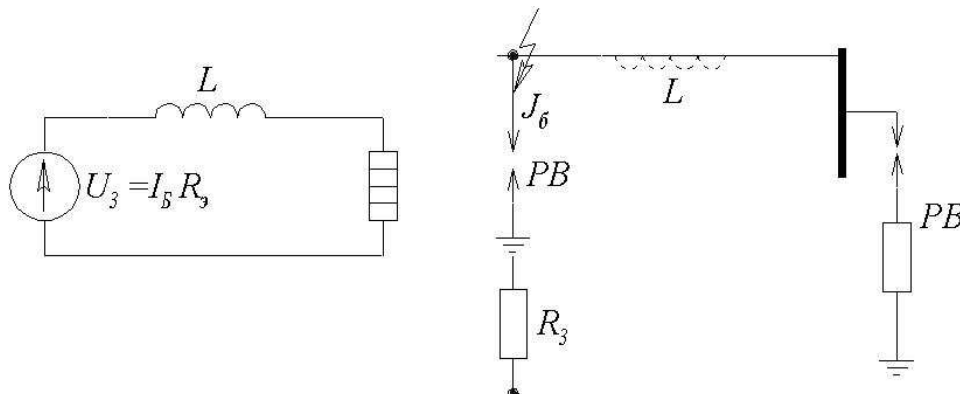


Рис. 5 – Схема заміщення лінії

Задача 2

Кінцева підстанція, на якій встановлено трансформатор з незаземленою нейтраллю, живиться по одноланцюговій лінії.

Необхідно визначити напругу гасіння U_z при однофазному КЗ і оцінити можливість встановлення розрядників РВС-110 або РВМГ-110.

$K_z = U/U_{cp}$ – відношення максимальної напруги на невраженій фазі при однополюсному КЗ найбільшій робочій напруги.

Варіанти: РВС-35; РВС-220.

Рішення

Коефіцієнт гасіння:
$$K_z = \frac{U_{np}}{U \cdot \sqrt{2}},$$

де U_{np} – напруга пробою розрядника.

Захисний коефіцієнт:
$$K_z = \frac{U_{ocm}}{U \cdot \sqrt{2}};$$

U_{ocm} – напруга на резисторі при проходженні струму $I_0 = 10$ кА.

При таких умовах відношення реактивних та активних опорів нульової та прямої послідовності на шинах кінцевої підстанції визначається самою лінією. Для одноланцюгової лінії без тросів:

$$x_o/x \approx 3,5; \quad r_o/x_1 \approx 0,1,$$

тут r_o, x_o – активний і реактивний опір мережі на шляху струму нульової послідовності;

x_1 – реактивний опір мережі на шляху струму прямої послідовності.

За графіком (рис. 6) знаходимо, що точкам з такими координатами відповідають:

$$K_z \approx 1,35 < 1,4; \quad (U < 1,4U_\phi).$$

При живленні ПС дволанцюговою лінією відношення $x_o/x \approx 4,7 - 5,5$.

З графіка видно, що в цьому випадку $K_z > 1,4$ і розрядники можна використовувати лише у випадку заземлення нейтралі трансформатора, що приводить до різкого зниження x_o/x та $U_{zас}$.

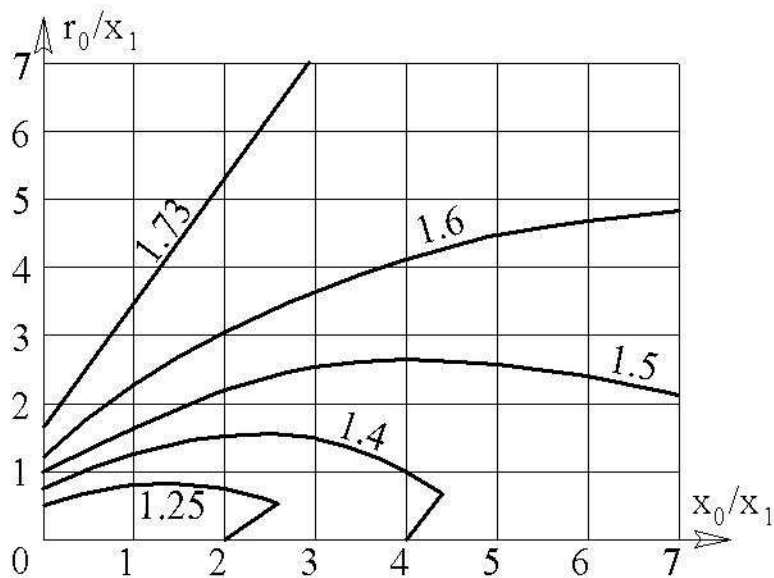


Рис. 6 – Графіки коефіцієнтів заземлення нейтралі мережі для різних x_0/x_1 і r_0/x_1

Задача 3

Визначити питоме число відключень двохланцюгової лінії 220 кВ, яка захищена тросом, навішеним на металевій опорі висотою $h = 32$ м, і має кут захисту $\alpha = 25^\circ$. Хвильовий опір троса $Z = 400$ Ом, коефіцієнт зв'язку троса з верхніми проводами $k = 0,2$; довжина прольоту $L = 300$ м, крутість фронту імпульсу перенапруги $a = 20$ кА/мкс.

Варіанти: $L = 200$ м; $L = 100$ м. $a = 30$ кА/мкс; $a = 40$ кА/мкс; $a = 50$ кА/мкс.

Рішення

Визначаємо питоме число прямих ударів блискавки (ПУБ) в лінію з тросом за формулою

$$n = 0,08 \cdot h = 0,08 \cdot 32 = 2,6.$$

Імовірність прориву блискавки через тросовий захист визначаємо за формулою:

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{on}}}{90} - 4 = (25 \cdot 32/90) - 4 = -2,43.$$

Звідки: $P_\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3}$.

Імовірність перекриття ізоляції внаслідок ПУБ в опорі приймаємо $P_{on} = 0,03$.

Тоді питоме число перекриття внаслідок ПУБ в трос:

$$n = 0,6 \cdot n \cdot P_{on} = 0,047.$$

Питоме число перекриття ізоляції дорівнює:

$$n_{nep} = 0,047 + 0,0095 = 0,0565.$$

Питоме число відключень лінії:

$$n_{vid} = \eta \cdot n_{nep} = \eta \cdot n \cdot (P_{\alpha} + 0,6P_{on}) = 0,8 \cdot 0,0565 = 0,045.$$

В Україні число грозових днів у році складає $n = 40$, тому число відключень лінії на 100 км на рік дорівнює $\approx 1,5 \div 1,6$.

Задача 4

Прямокутна хвиля набігає на підстанцію, від шин якої відходять декілька ліній. Визначити напругу на шинах підстанції, якщо:

- до шин приєднана ємність (рис. 7);
- в розсічку лінії включена індуктивність (рис. 8).

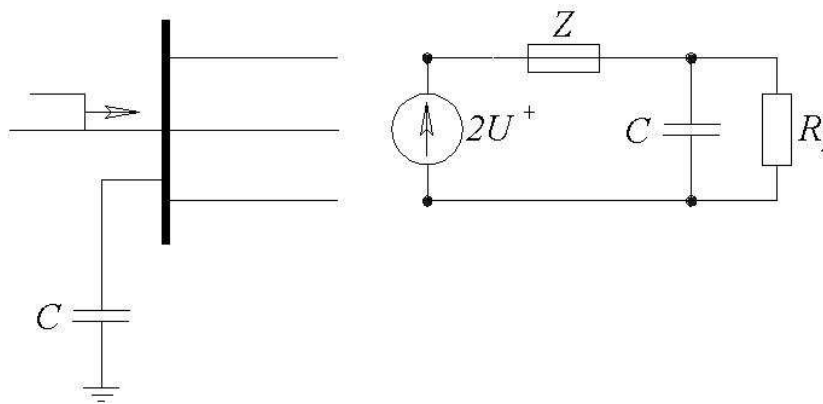


Рис. 7 – Схема приєднання до шини

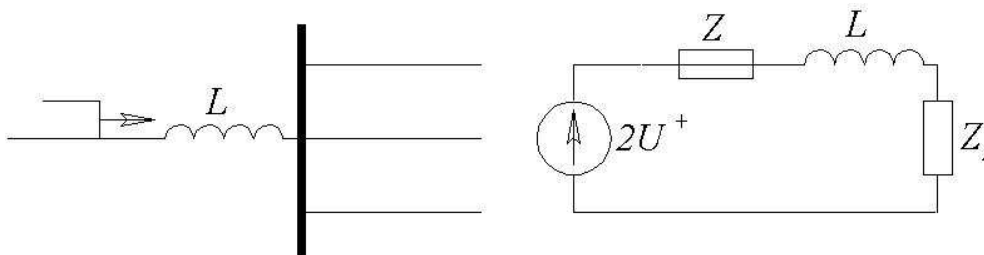


Рис. 8 – Схема заміщення лінії

Варіанти: $Z = 500 \text{ Ом}$; $Z = 500 \text{ Ом}$. $C = 1\text{-}2 \text{ мкФ}$; $C = 2\text{-}3 \text{ мкФ}$.

Рішення

Пошукана напруга на шинах підстанції є напругою на опорі Z_1 , який є еквівалентним опором відходячих ліній. Преломлена хвиля для обох схем визначається за формулою

$$U(t) = U_o \cdot \frac{Z_1}{Z + Z_1} \cdot (1 - e^{-t/T}),$$

де хвилевий опір лінії $Z = 500 \text{ Ом}$, Z_1 – опір навантаження.

Тут T_c – постійна часу з ємністю C .
$$T_c = C \cdot \frac{Z \cdot Z_1}{(Z + Z_1)}.$$

Величина постійної часу T_c , якщо ємкість шин з підключеною апаратурою дорівнює 0,001 – 0,005 мкФ, а для тупикової підстанції з підключеною ЛЕП $Z = 500$ Ом, дорівнює: $T_c = C \cdot Z = 0,5 - 2,5$ мкс.

Для $C = 0,5 - 1$ мкФ, $T_c = 250 \div 500$ мкс.

Задача 5

Розрахувати максимальну напруженість електричного поля на проводах розщепленої фази ЛЕП-500 кВ. Проводи ЗхАСО-500, діаметр $r_o = 1,51$ см, відстань між фазами $d = 10,5$ м, радіус розщеплення $a = 40$ см, середня висота підвісу проводу $h = 13,1$ м.

Варианти: ЛЕП-330 кВ; ЛЕП-220 кВ. $h = 10$ м; $h = 8$ м.

Рішення

Визначаємо еквівалентний радіус пучка: $r = \sqrt[3]{r_o \cdot a^2} = \sqrt[3]{1,51 \cdot 402} = 13,4$ см.

Потенційні коефіцієнти α_{nm} , що характеризують зв'язок потенціалів і зарядів в системі з n -проводів знаходимо з рівнянь Максвелла:

$$\begin{aligned} U_1 &= \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 + \dots + \alpha_{1n}q_n, \\ &\dots\dots\dots \\ U_n &= \alpha_{n1}q_1 + \alpha_{n2}q_2 + \dots + \alpha_{nn}q_n, \end{aligned}$$

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33} = 0,018 \ln 2h_{cp}/r_e = 0,018 \cdot 2,3 \cdot \lg 2 \cdot 1310/13,4 = 0,094 \text{ м/пФ}.$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{13} = 0,018 \ln D_{12}/d_{12} = 0,018 \cdot 2,3 \lg \sqrt{1050^2 + (2 \cdot 1310)^2} / 1050 = 0,018 \text{ м/пФ}.$$

$$\alpha_{22} = 0,018 \cdot D_{23}/d_{23} = 0,018 \cdot 2,3 \lg \sqrt{(2 \cdot 1050)^2 + (2 \cdot 1310)^2} / 2 \cdot 1050 = 0,009 \text{ м/пФ.}$$

Знаходимо визначник Δ для трьохпровідної лінії:

$$\Delta = \alpha_{11} \alpha_{22} \alpha_{33} - \alpha_{11} (\alpha_{23})^2 - \alpha_{22} (\alpha_{31})^2 - \alpha_{33} (\alpha_{12})^2 + 2\alpha_{12} \alpha_{23} \alpha_{31} = 770 \cdot 10^6.$$

Знаходимо ємкісні коефіцієнти β проводів для трьохпровідної системи:

$$\beta_{11} = [\alpha_{22} \alpha_{33} - (\alpha_{23})^2] / \Delta = 11,3 \text{ пф/м}; \quad \beta_{12} = \beta_{21} = (\alpha_{23} \alpha_{31} - \alpha_{12} \alpha_{31}) / \Delta = -2 \text{ пф/м};$$

$$\beta_{22} = \beta_{33} = [\alpha_{11} \alpha_{33} - (\alpha_{13})^2] / \Delta = 11 \text{ пф/м}; \quad \beta_{23} = \beta_{32} = (\alpha_{31} \alpha_{12} - \alpha_{23} \alpha_{11}) / \Delta = -0,68 \text{ пф/м}.$$

$$\beta_{33} = \alpha_{11} \alpha_{22} - (\alpha_{12})^2 / \Delta; \quad \beta_{31} = \beta_{13} = (\alpha_{12} \alpha_{23} - \alpha_{31} \alpha_{22}) / \Delta.$$

Визначаємо робочі ємності фаз:

$$C_1 = q_1 / U = \beta_{11} - \frac{1}{2}(\beta_{12} + \beta_{13}) = 11 + (2 + 2)/2 = 13,3 \text{ пф/м};$$

$$C_2 = q_2 / U = \beta_{22} - \frac{1}{2}(\beta_{21} + \beta_{23}) = 11 + (2 + 0,68)/2 = 12,3 \text{ пф/м};$$

$$C_3 = q_3 / U = \beta_{33} - \frac{1}{2}(\beta_{31} + \beta_{32}) = 11 + (2 + 0,68)/2 = 12,3 \text{ пф/м}.$$

Амплітуда фазної напруги при максимальній робочій напрузі 525 кВ:

$$U_\phi = 525 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 428 \text{ кВ}.$$

Відповідно, питомі заряди на проводах:

$$q_1 = C_1 \cdot U = 13,3 \cdot 428 \cdot 10^3 = 5,7 \cdot 10^6 \text{ пф/м},$$

$$q_2 = q_3 = C_2 \cdot U_\phi = 12,3 \cdot 428 \cdot 10^3 = 5,26 \cdot 10^6 \text{ пф/м}.$$

Визначаємо напруженість поля на поверхні проводів:

$$E_1 = 0,018 q_1 / 3r_o = 2,6 \text{ кВ/см};$$

$$E_2 = E_3 = 0,018 \cdot 5,27 \cdot 10^6 / 3 \cdot 1,51 = 20,9 \text{ кВ/см}.$$

Задача 6

На лінії 500 кВ, яка містить 3000 гірлянд з $s = 20$ ізоляторів в гірлянді, статистика випробувань свідчить, що за час $T = 3$ роки виходять з ладу приблизно 1800 ізоляторів. Визначити імовірне число гірлянд з $r = 4$ «нульовими» ізоляторами.

Варіанти: ЛЕП-110 кВ; ЛЕП-220 кВ; ЛЕП-330 кВ. $s = 8$; $s = 12$; $s = 16$.

Рішення

Визначаємо імовірність пошкодження одного ізолятора:

$$P = \frac{n}{m},$$

тоді імовірність

$$p = \frac{1800}{20} \cdot 3000 \approx 0,03.$$

Імовірність появи в гірлянді, яка складається з s ізоляторів m дефектних, визначаємо за формулою:

$$P_m = C_{20}^4 \cdot p_m (1 - p)^{n-m} = C_{20}^4 \cdot 0,03^4 (1 - 0,03)^{20-4} = 2 \cdot 10^{-3}.$$

Імовірне число гірлянд з 4 «нульовими» ізоляторами буде дорівнювати:

$$D_m = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 = 6.$$

Такі гірлянди можуть бути «перекриті» робочою напругою, тому слід рекомендувати скоротити строк профілактичних випробувань.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Техника высоких напряжений (Под ред. Кучинского Г. С.). – СПб.: Энергоиздат, 2003. – 256 с.
2. Бибииков М. О., Комаров О. С. «Техника высоких напряжений». – М.: Энергия, 2004. – 345 с.
3. Базуткін В. В., Ларіонів Ю. С. «Техника высоких напряжений». – М.: Энергоиздат, 1999. – 464 с.
4. Степанчук К. Ф., Тиняков Н. А. «Техника высоких напряжений». – Минск: В. Ш., 1992. – 367 с.
5. Рой В. Ф. Конспект лекцій з курсу «Техніка та електрофізика високої напруги». – ХНАМГ, 2009. – 172 с.
6. Рой В. Ф. Методичні вказівки до самостійного вивчення курсу «Техніка та електрофізика високих напруг». – ХНАМГ, 2008. – 50 с.
7. ГКД 34.35.512 Средства защиты от перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. – К., 2004. – 134 с.

ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ ДО КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Тема №	Задачі	Варіанти	Номер за списком	Тема №	Задачі	Варіанти	Номер за списком
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	3	1	1	52
		2	2			2	53
		3	3			3	54
		4	4			4	55
		5	5			5	56
	2	1	6		2	6	57
		2	7			1	58
		3	8			2	59
		4	9			3	60
1	3	1	10	3	2	4	61
		2	11			5	62
		3	12		3	1	63
		4	13			2	64
		5	14			3	65
		6	15			4	66
	4	1	16			5	67
		2	17		4	1	68
		3	18			2	69
		4	19			3	70
		5	20			4	71
		6	21	4	1	1	72
		7	22			2	73
		8	23			3	74
2	1	1	24			4	75
		2	25			5	76
		3	26			6	77
		4	27		2	1	78

Продовження Додатку

1	2	3	4	5	6	7	8
		1	28			2	79
		2	29			3	80
		3	30			4	81
2	2	4	31	4	2	5	82
		5	32		3	1	83
		6	33			2	84
	3	1	34			3	85
		2	35		4	4	86
		3	36			1	87
		4	37			2	88
		5	38			3	89
		6	39			4	90
		7	40		5	1	91
	4	1	41			2	92
		2	42			3	93
		3	43			4	94
		4	44		6	1	95
		5	45			2	96
	5	1	46			3	97
		2	47			4	98
		3	48			5	99
		4	49			6	100
		5	50				
		6	51				

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки
до проведення практичних занять
з курсів

«ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА ВИСОКОЇ НАПРУГИ»
та

«ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ»

(для студентів 4 курсу денної та 4-5 курсів заочної форм навчання
напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»)

Укладач **РОЙ Віктор Федорович**

Відповідальний за випуск *В. А. Малярєнко*

Редактор *З. І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2011, поз. 249 М

Підп. до друку 21.01.2011

Формат 60×84/16

Друк на ризографі.

Ум. друк. арк. 1,2

Тираж 50 пр.

Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4064 від 12.05.2011 р.